

BaTiO₃晶体薄膜波导极化导模与晶体双折射和波导结构的相关性

韩月, 孙德贵*

长春理工大学, 理学院, 吉林 长春
Email: *sundg@cust.edu.cn

收稿日期: 2020年12月23日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

钛酸钡(BaTiO₃)作为具有超高电光效应的铁电晶体, 近年来已经成为光电子器件领域研究的前沿和热点之一。本文研究了BaTiO₃晶体薄膜波导中光偏振态的变化与晶体双折射和波导结构的关系, 从理论上对BaTiO₃晶体薄膜波导结构的双折射与光偏振态之间的关系进行了建模, 并通过实验得到了两种不同波导结构得到的输出光偏振态。进一步, 结合理论和实验结果, 分析了光偏振态变化与晶体双折射和波导结构的关系。

关键词

BaTiO₃晶体薄膜波导, 偏振态, 双折射, 波导

Correlation of the Polarized Guided Modes of BaTiO₃ Crystal Film Waveguide with the Crystal Birefringence and Waveguide Structure

Yue Han, Degui Sun*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin
Email: *sundg@cust.edu.cn

Received: Dec. 23rd, 2020; accepted: Jan. 20th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 韩月, 孙德贵. BaTiO₃晶体薄膜波导极化导模与晶体双折射和波导结构的相关性[J]. 应用物理, 2021, 11(1): 62-67. DOI: 10.12677/app.2021.111008

Abstract

Barium titanate (BaTiO_3), as a ferroelectric crystal with high electro-optical effect, has become one of the frontiers and hot topics in the field of optoelectronic devices in recent years. This paper reports on an investigation of the correlations of polarization modes with the birefringence and structure of BaTiO_3 crystal film waveguides. In theory, the relation between the optical polarized mode and the birefringence of BaTiO_3 crystal film waveguide structure is modeled, and then the numerical simulations are carried out. In experiments, the different polarization modes of two different waveguide structures are observed. Further, based on the theoretical and experimental results, the correlations of the polarized modes with both the birefringence and waveguide structure are analyzed.

Keywords

BaTiO_3 Crystal Film Waveguide, Polarization State, Birefringence, Waveguide

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着光通信网络的迅猛发展,各种类型光波导器件的研究与应用也越来越受到重视,其中光波导器件的集成化倍受关注。集成化就是将各种类型的光波导器件和电路控制装置建立一个半导体器件上,使该半导体器件具有光学功能的同时也具有电子学的功能,同时还能实现电光、声光、磁光等物理效应[1] [2] [3]。在光通信网络中,以光波导为基本结构的光电子器件是光通信中重要的组成部分,光波导器件包括电光波导调制器、光波分复用/解复用器、放大器、光开关、耦合器和光连接器等[4] [5] [6]。特别是近年来,基于波导技术的集成光学器件和模块得到了广泛的发展和應用,光通信系统的数据速率和容量也在迅速增长。

光波导主要由三个部分组成:芯层(波导层)、包层、基底,其中芯层的折射率要大于基底和包层,在光的入射角大于芯层与包层和基底之间的两个界面的临界角时,输入光将在芯层内发生全反射,此时光被束缚在芯层内传播。所以,对基于波导技术的集成光学器件而言,芯层材料的选择非常重要。钛酸钡(BaTiO_3)是最早发现的一种具有 ABO_3 型钙钛矿晶体结构的典型铁电体,它具有高介电常数及铁电、压电和正温度系数效应等优异的电学性能[7] [8] [9]。同时,薄膜型 BaTiO_3 晶体还具有稳定性好,易形成波导等优点,在薄膜波导光电子器件领域中有重要的研究价值[10] [11] [12]。

按照光学性质, BaTiO_3 晶体属于中级晶族中的单轴晶体,它有两个主折射率,当两个主折射率不同时则晶体现出各向异性。晶体的光学各向异性指的是光信号偏振态或者传播方向的不同而表现出的光输出信号物理性质的不同,晶体的双折射现象就是由晶体本身的各向异性引起的。本论文将在薄膜型 BaTiO_3 晶体上直接刻蚀不同脊宽的脊型波导,并结合波导输入光偏振态与输出光偏振态之间的相位变化,研究 BaTiO_3 晶体薄膜波导中光偏振态的变化与晶体双折射和波导结构的关系。

2. 理论原理

BaTiO_3 晶体薄膜生长技术主要有激光脉冲沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)和金属-有机物-化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)两种。我们的波导结构是使用 PLD 技术在 0.5 mm

厚的氧化镁(MgO)晶体衬底上生长了 450 nm 厚的 BaTiO₃ 薄膜, 并在薄膜上直接刻蚀出脊型波导结构。

在制作实际器件时, 需要在脊型波导表面覆盖一层 SiO₂ 保护层, 而 BaTiO₃ 与 SiO₂ 在折射率上有着很大的差值, 这个折射率差会使 BaTiO₃ 在弯曲波导上存在一个物理边界, 这个边界可以有效地将光束束缚在 BaTiO₃ 晶体薄膜中, 从而使更多的光在芯层中传播, 对应的能量损耗也就越低。为了设计并制作出光损耗最小的波导器件, 在器件结构的选择上, 由于脊型波导可以更好的将光的能量和模式大部分都约束在脊中, 减少光损耗, 所以我们研究的是全 BaTiO₃ 脊型波导模型。图 1 是 BaTiO₃ 晶体薄膜脊型波导的基本结构, 其中 W_r 是波导脊宽, H 是波导脊高, T_f 是 BaTiO₃ 晶体薄膜的厚度。

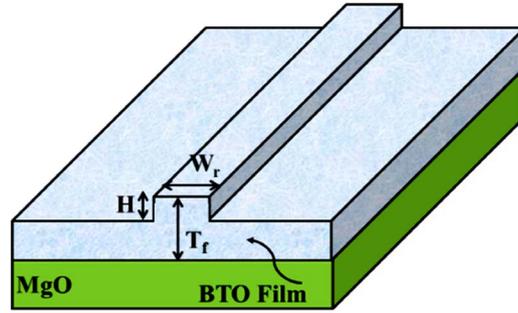


Figure 1. Schematic straight rib waveguide structure of BaTiO₃ crystal film
图 1. BaTiO₃ 晶体薄膜脊型波导结构示意图

BaTiO₃ 晶体与其它双折射晶体相同, 其水平偏振态和垂直偏振态的折射率(n_x 和 n_y)之差形成了光束在传输中的双折射值, 定义为 $\delta n_{xy} = n_y - n_x$ 。在如图 2 所示的 x - y 坐标系中, 由该双折值引起了光波的水平偏振态和垂直偏振态的合成光波偏振态在传输过程中具有不同的光相位值, $\Delta\phi_{xy} = 2\pi\delta n_{xy}/\lambda$ (λ 为光波长), 进而引起了如图 2 所示的合成光波电场矢量的椭圆分布, 其中在原坐标系统的长短轴的半长度分别为 A_x 和 A_y , 与两个方向偏振态相位差 $\Delta\phi_{xy}$ 共同决定椭圆方位角 α_{ellps} , 由坐标 X 与 Y 旋转后的长短轴半长度 a 和 b 决定椭圆的形状, 图中 ϵ_{ellps} 代表旋转的坐标系统中 a 和 b 形成的椭圆方位角。于是, 椭圆方位角 α_{ellps} 由下面的方程定义[13]:

$$\tan 2\alpha_{ellps} = \frac{2A_x A_y}{A_x^2 - A_y^2} \cos \Delta\phi_{xy} \tag{1}$$

进而, 获得该晶体折射率椭球在新坐标系统 OXY 中的方程:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \tag{2}$$

在以上坐标变换中, 新坐标系统 OXZ 中几何参数与原坐标几何参数的关系有以下定义:

$$a^2 = A_x^2 \cos^2 \alpha_{ellps} + A_y^2 \sin^2 \alpha_{ellps} + A_x A_y \sin 2\alpha_{ellps} \cos \phi_{xy} \tag{3}$$

$$b^2 = A_x^2 \sin^2 \alpha_{ellps} + A_y^2 \cos^2 \alpha_{ellps} - A_x A_y \sin 2\alpha_{ellps} \cos \phi_{xy} \tag{4}$$

$$ab = \pm A_x A_y \sin \phi_{xy} \tag{5}$$

坐标变换前后椭圆长短轴之间有关系式: $a^2 + b^2 = A_x^2 + A_y^2$ 。

以上偏振态方程是基于平面光波的, 对于一个光波导通道而言, 光传输的双折射相位值应该由光导波模式在 X 与 Y 偏振态的有效折射率 $N_{eff}(X)$ 和 $N_{eff}(Y)$ 定义为: $\delta n_{xy} = N_{eff}(Y) - N_{eff}(X)$, 进而 $\Delta\phi_{xy} = 2\pi\delta n_{xy}/\lambda$ 。

于是, 光波导通道的导波模式的偏振态从输入到输出的传输过程, 通过方程(1)~(5)可以获得类似于图 2 所示的光波偏振态椭圆分布。这样, 根据以上理论模型所获得光偏振态矢量图, 可随时确定光波输出光信号的偏振态分布(线偏振态是特殊状态)与双折射决定的光相位值, 进而判断晶体薄膜波导双折射值的大小。

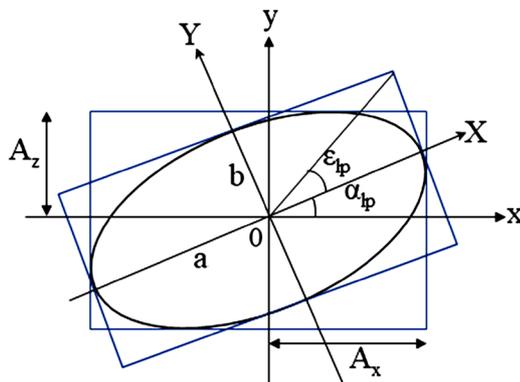


Figure 2. Schematic ellipse of the electric field polarization of light-wave in a birefringent crystal
图 2. 晶体的双折射引起的光波电场偏振态的椭圆分布示意图

3. 实验与分析

基于晶体的双折射引起的光波电场偏振态的理论研究, 本文设计了两种不同结构的 BaTiO₃ 晶体薄膜波导, 并通过实验得到了两种不同结构对应的输出光偏振态的变化。两种波导结构脊宽 W_r 分别为 3 μm 与 4 μm , 脊高 H 均为 0.1 μm , 波导长度均为 7 mm, 制作的波导如图 3 所示。

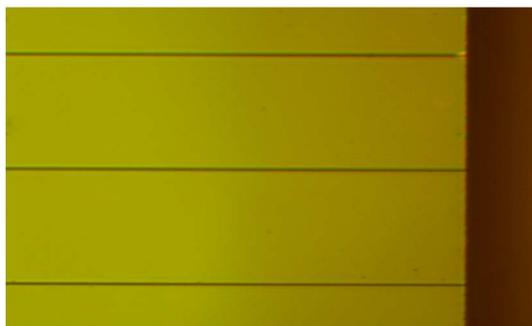


Figure 3. Image of the waveguide
图 3. 波导实物图

针对 BaTiO₃ 晶体薄膜波导的偏振态变化分析, 实验装置如图 4 所示。该实验装置中, 最关键的部分是输入端的偏振控制器和输出端的偏振分析仪。首先, 1550 nm 波长的连续光信号从激光器中发出,

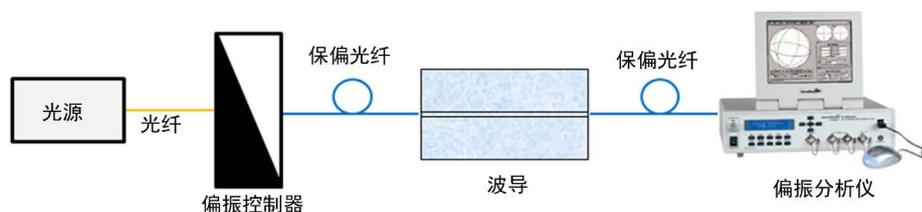


Figure 4. Schematic of experimental device
图 4. 实验装置图

通过偏振控制器分别设置 4 种不同线偏振态的输入光, 并使用锥形保偏光纤使光信号输入到波导通道中, 然后输出光信号通过保偏光纤连接到偏振分析仪上, 通过偏振分析仪观察输出光的偏振态, 得到的偏振态变化如图 5 所示。

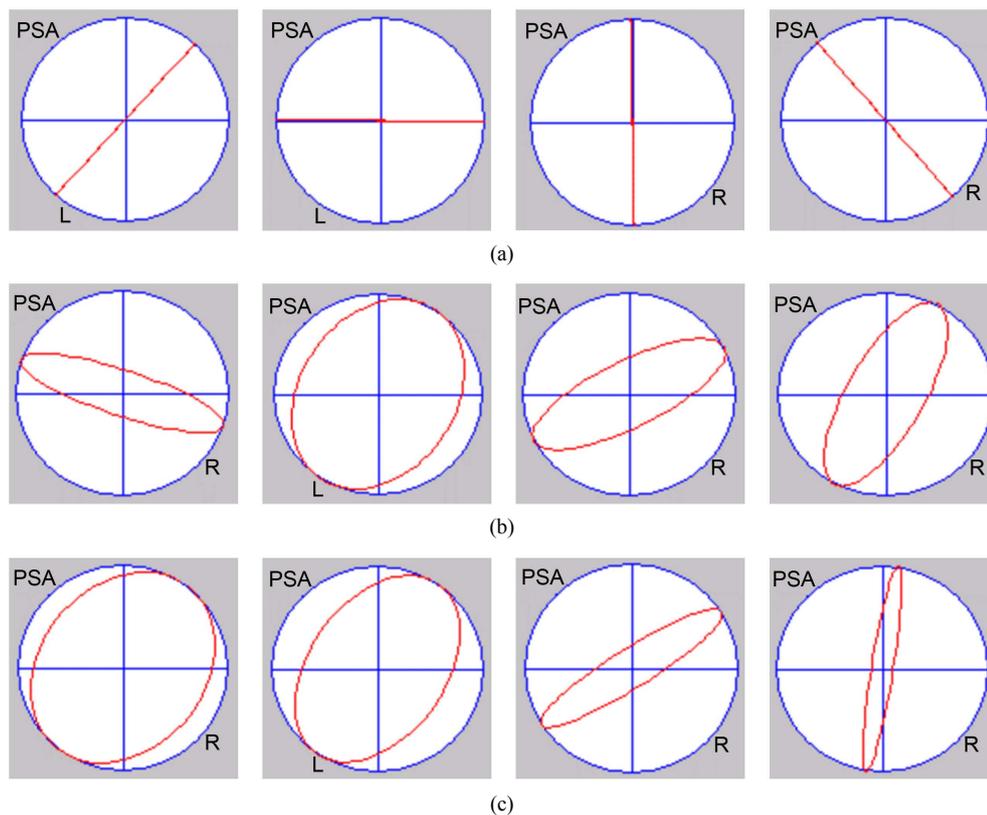


Figure 5. The experimental results of optical polarization are obtained with different ridge widths. (a) Four different polarization states of input light; (b) The output polarization of 3 μm waveguide ridge width; (c) The output polarization of 4 μm waveguide ridge width

图 5. 不同波导脊宽时输出光偏振态实验结果。(a) 四种不同输入光偏振态; (b) 波导脊宽 3 μm 时对应的输出光偏振态; (c) 波导脊宽 4 μm 时对应的输出光偏振态

从图 5(a)中可以看出, 输入光分别设置为是右 45°线偏振态, 水平线偏振态, 垂直线偏振态和左 45°线偏振态, 图 5(b)列出了波导脊宽 3 μm 时, 对应图 5(a)中四种不同输入光偏振态得到的输出光偏振态, 图 5(c)列出了波导脊宽 4 μm 时, 对应图 5(a)中四种不同输入光偏振态得到的输出光偏振态。根据图 5(b)和图 5(c)可以看出, 线偏振态的输入光, 通过波导后变成椭圆偏振光, 光相位发生了变化, 而且两个不同脊宽的波导产生的光相位变化明显不同。

根据参考文献[13], 并结合理论研究, 对图 5 得到的输出偏振态进行偏振态分析和相位分析。当输入光是右 45°线偏振态时, $\varphi = 0$, 对应波导脊宽 3 μm 的输出光偏振态是右旋窄椭圆且长轴位于左 45°+方向上, 所以光相位在 $\varphi = -3\pi/4$ 附近; 对应波导脊宽 4 μm 的输出光偏振态是仍为右旋椭圆且长轴位于右 45°方向上, 所以光相位在 $\varphi = -\pi/4$ 。输入光偏振态和输出光偏振态产生的光相位变化分别为 $-3\pi/4$ 和 $-\pi/4$; 当输入光是左旋水平线偏振态时, 光相位位于 $\varphi = \pi/4$ 和 $\varphi = \pi/2$ 之间, 对应波导脊宽 3 μm 和 4 μm 的输出光偏振态均为左旋椭圆且长轴位于右 45°方向上, 于是对应的光相位均为 $\varphi = \pi/4$, 输入光偏振态和输出光偏振态产生的光相位变化均位于 0 和 $\pi/4$ 之间; 当输入光是右旋垂直线偏振态时, 光相位位于 $\varphi = -3\pi/4$ 和 $\varphi = -\pi/2$ 之间, 对应波导脊宽 3 μm 和 4 μm 的输出光偏振态均为右旋椭圆且长轴位于左 135°(即

右 45°) 方向上, 于是对应的光相位均为 $\varphi = -\pi/4$, 输入光偏振态和输出光偏振态产生的光相位变化均位于 $\pi/2$ 和 $\pi/4$ 之间; 当输入光是左 45° 线偏振态时, $\varphi = -\pi$, 对应波导脊宽 $3 \mu\text{m}$ 的输出光偏振态是右旋窄椭圆且长轴位于右 45° 方向上, 所以光相位为 $\varphi = \pi/4$, 输入光偏振态和输出光偏振态产生的光相位变化为 $5\pi/4$; 对应波导脊宽 $4 \mu\text{m}$ 的输出光偏振态是仍为右旋超窄椭圆且长轴位于右 10° 方向上, 非常接近垂直线偏振态, 所以光相位位于 $\varphi = -3\pi/4$ 和 $\varphi = -\pi/2$ 之间, 输入光偏振态和输出光偏振态产生的光相位变化均位于 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 之间, 接近 $\pi/2$ 。通过以上分析可以得出, 线偏振态的输入光通过波导输出后变成椭圆偏振光, BaTiO_3 晶体薄膜波导本身具有的初始双折射值和波导结构对偏振态的影响很大。

4. 结论

通过研究 BaTiO_3 晶体薄膜波导中光偏振态变化与波导双折射和结构的关系, 对波导结构的光偏振模式与双折射之间的关系进行了理论计算分析, 得到了晶体的双折射引起的光波电场偏振态的椭圆分布示意图, 所获得光偏振态矢量图, 可随时确定光波输出光信号的偏振态分布(线偏振态是特殊状态)与双折射决定的光相位值。制作了不同波导脊宽的全 BaTiO_3 脊型波导, 并进行了光偏振态变化的实验研究与分析。实验结果表明, BaTiO_3 晶体薄膜波导本身具有双折射, 对应不同的光信号偏振态, 波导结构不同, 光相位变化的程度不同。以上 BaTiO_3 晶体薄膜双折射值和波导结构对偏振态影响的实验结果与分析, 为 BaTiO_3 晶体薄膜波导电光调制器的研究奠定了基础, 也为进一步开发和应用基于该晶体薄膜双折射和折射率调制的光器件提供了有利依据。

参考文献

- [1] Hwang, S.J., Yu, H.H. and Wang, J. (2004) Electro-Optic Modulators Formed by In-Plane Electric-Field-Poled Polymer Waveguides. *Optics Communications*, **233**, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.01.059>
- [2] Ma, H., et al. (2002) Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices. *Advanced Material*, **14**, 1339-1365. [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(20021002\)14:19%3C1339::AID-ADMA1339%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-4095(20021002)14:19%3C1339::AID-ADMA1339%3E3.0.CO;2-O)
- [3] Stewart, G. and Laybourn, P. (1978) Fabrication of Ion-Exchanged Optical Waveguides from Dilute Silver Nitrate Melts. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **14**, 930-934. <https://doi.org/10.1109/JQE.1978.1069721>
- [4] 陈益新. 集成光学: 理论和技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [5] 陈福深. 集成光学器件导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 蔡红星, 雷建国, 朱万彬. 光波导原理与器件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 56-63.
- [7] 魏贤华, 黄文, 接文静, 等. BaTiO_3 铁电薄膜在硅基片上的取向生长[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 583-587.
- [8] 张静, 付秀华, 杨飞, 等. BaTiO_3 晶体薄膜 PLD 法生长工艺参量研究[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 71-75.
- [9] 蔡玉平, 冯蒙丽, 宋春荣. BaTiO_3 对称性与电光性能的研究[J]. 军械工程学院学报, 2015(6): 72-75.
- [10] Zhang, J., Fu, X.H., Guo, L.J., et al. (2014) Design and Fabrication of BaTiO_3 Crystal Thin-Film Waveguides. *Key Engineering Materials*, **609-610**, 201-207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.201>
- [11] Sun, D.G., Fu, X., Hall T.J., et al. (2013) Analysis for the Nonlinear Electro-Optic Modulation Effect of BaTiO_3 Crystal Thin-Film Waveguide Modulators. *Journal of Applied Physics*, **113**, 5941. <https://doi.org/10.1063/1.4803707>
- [12] Abel, S., Stöferle, T., Marchiori, C., et al. (2013) A Strong Electro-Optically Active Lead-Free Ferroelectric Integrated on Silicon. *Nature Communications*, **4**, 1671. <https://doi.org/10.1038/ncomms2695>
- [13] Huard, S. (1997) Polarized Optical Waves. In: Huard, S., Ed., *Polarization of Light*, Chapter 1, Wiley Press, New York, 1-35.